

狭域および広域における建築物の直接被害を対象とした津波リスクの定量評価手法の提案

著者	福谷 陽
号	60
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第5247号
URL	http://hdl.handle.net/10097/00120578

氏 名	ふく たに よう 福 谷 陽
授 与 学 位	博士 (工学)
学 位 授 与 年 月 日	平成 2 8 年 3 月 2 5 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 土木工学専攻
学 位 論 文 題 目	狭域および広域における建築物の直接被害を対象とした津波リスク の定量評価手法の提案
指 導 教 員	東北大学教授 今村 文彦
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 今村 文彦 副査 東北大学教授 寺田 賢二郎 副査 東北大学教授 越村 俊一

論 文 内 容 要 旨

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震による巨大津波は、日本列島の太平洋沿岸域を中心に未曾有の被害をもたらした。この被害経験を踏まえた津波リスクの定量的把握が津波防災対策上の急務となっているが、これまで、原子力発電施設や設備を対象とした津波リスクの定量評価手法が提案されているものの、一般的な建築物への適用性には限界があった。そこで、本研究では、確率論的津波ハザード評価の活用の主眼をおいた、一般的な建築物の直接被害を対象とした津波リスクの定量評価手法を、狭域および広域の観点から提案を行った。狭域の観点からは、一地点に立地する一建築物の被害を対象とした詳細な津波リスクの定量評価手法を提案した。一方、広域の観点からは、多地点に立地する多数の建築物全体を対象とした津波リスクの定量評価手法についての検討を行った。巨大断層による津波ハザードの確率論的評価手法を改良して、東北地方太平洋沖地震津波の教訓を踏まえた津波リスクの定量評価手法を提案し、その不確実性を明らかにすると共に、津波リスクはハザード評価と脆弱性評価を組み合わせることで初めて適切に理解出来ることを定量的に示したことが本研究の主たる成果であり、提案する手法は今後の防災対策推進上有効な手法になると期待される。

第 1 章では、本研究の背景、関連する既往研究の概要、本研究の対象範囲および目的と意義に関して述べる。

第 2 章では、津波数値計算の結果を用いた詳細な津波リスクの定量評価手法を提案する前段として、津波観測記録のみを用いて津波波高と年超過確率の関係を導出し、津波波高の期待値を簡易的に評価する手法を提案する。提案した評価手法を用いて、公開された津波データベースを使用し、日本の 8 地域（十勝・女川・両津・舞阪・白浜・小松島・土佐清水・油津）を対象として、各地域における津波波高の期待値を評価した。結果、津波波高の期待値は、女川が最大で、小松島が最小となった。女川は他地点と比較すると、過去の最大津波波高および波高の上限値が大きく、かつ、津波の発生頻度が高くなっており、この結果、津波波高の期待値が大きくなっていた。これは、東北地方太平洋沖地震で発生した津波波高が高いこと、かつ、比較的短い周期で発生している宮城県沖地震に起因する津波の発生頻度が高いことと整合している。小松島は太平洋沿岸に位置しており、南海トラ

フ地震津波による影響を受け易い地域であるが、外洋ではなく内海に位置しており、地震の断層破壊から発生する津波のエネルギーを直接受けることがないため、津波波高の期待値も小さい結果になると考察された。提案した評価指標を用いることで、地域間の津波波高の大小が明確となり、例えば、防災対策を実施する際の優先順位を決定することが出来る。また、津波波高の期待値を定量評価するだけでなく、期待値を算出する過程で得られる津波波高と年超過確率の関係を、歴史地震の特徴に照らして捉えることで、地域の津波ハザードの特徴を適切に把握することが可能である。さらに、提案した評価指標は、過去の津波の観測記録さえ揃っていれば容易に計算可能であるため、多数のケースを計算して初めて評価できる確率論的津波ハザード評価を実施する前に、地域の津波ハザードの特徴を、まずは簡略に理解可能な有用な指標となる。

第3章では、津波ハザード評価に伴う認識論的不確実性および偶然的不確実性を、ロジックツリーおよび確率密度分布を用いて考慮し、東北地方太平洋沖合における確率津波波高とその不確実性を定量的に評価する。2011年東北地方太平洋沖地震津波の教訓を最大限に活かした沿岸波高の確率論的評価および不確実性評価を実施するため、巨大断層面上の不均質な滑り域の変化をロジックツリーに取り込み、また、巨大断層の破壊伝播速度や破壊開始点の変化が津波波高に及ぼす影響を確率密度分布として定量化し、確率論的津波ハザード評価を実施した。確率論的津波ハザード評価で用いる巨大断層面上の不均質な滑り域や滑り量については、経験的に評価する従来手法に代え、本研究では、Correlated Random Source Parameter Modelを用いて客観的に評価する手法を新たに提案した。このモデルでは、断層面上の滑り域と滑り量が、過去の地震記録から得られた面的な滑り分布を統計的に処理して評価した確率密度分布に基づいてランダムに生成されるため、断層面上の滑り域と滑り量を経験則によって決める必要が無いという利点がある。また、巨大断層の破壊伝播速度や破壊開始点の変化が津波波高に及ぼす影響の評価では、まず、過去の地震記録から破壊伝播速度の確率密度分布を導出し、その確率密度分布に基づいた破壊伝播速度をモンテカルロ計算により100ケース発生させた。それら破壊伝播速度を用いて、破壊開始点の変化も5ケース考慮し、合計500ケースの津波数値計算を実施することで、破壊伝播速度や破壊開始点の変化が最大津波波高に及ぼす影響を、津波波高の空間的な誤差が従う対数正規分布の標準偏差として定量的に評価した。結果、水深50m地点での空間的な誤差は、対数正規分布の標準偏差で0.043と小さい値となった。上記の手法で事前に評価した津波波高の空間的な誤差が従う確率密度分布を偶然的不確実性として確率論的津波ハザード評価に組み込む事で、巨大断層の破壊伝播速度や破壊開始点の変化が津波波高に及ぼす効果が、津波数値計算を実施することなく、確率論的に評価可能となる。日本海溝沿いの11の地震断層領域を対象としてロジックツリーを構築し、東北地方太平洋沖合を対象として、確率津波波高とその不確実性を定量評価した結果、津波波高の変動係数が岩手県沖合や鹿島灘周辺で相対的に大きくなる等、津波波高の不確実性は地域差が大きいことを明示出来た。また、岩手県のリアス式海岸部に着目すると、外洋に面した地点では、津波波高の標準偏差、変動係数が相対的に大きいものに対して、内海の地点では、津波波高の標準偏差、変動係数が相対的に小さくなっていた。

これらの結果は、リアス式海岸特有の地形効果による影響を反映していると考えられる。津波波高の不確実性の地域差を定量化して理解することは、地域の設計津波波高や最大クラスの津波波高を決定する際の重要な知見となる。

第4章では、まず、第3章において東北地方太平洋沿岸で確率論的に評価した津波波高の結果を用いて、相馬地域を対象として再現期間別の津波ハザードマップを導出する。再現期間別の津波ハザードマップは、複数の段階で津波浸水域、浸水深を示す。東北地方太平洋沖地震津波で過少評価であった津波ハザードマップを過信したために、適切な避難行動に繋がらなかった事例を考慮すると、再現期間別の津波ハザードマップは、地域住民等が津波ハザード評価の不確実性を理解し、適切な避難行動を促す助けになると考えられる。これまで、非線形長波方程式を用いた多数の津波遡上計算の結果を統計処理して評価した再現期間別の津波ハザードマップが提案されているものの、この手法では、初期潮位や防潮堤・防波堤・建築物に代表される人工構造物等の初期条件が変化すれば、膨大な津波遡上計算をその都度実施する必要性が生じる。沿岸の津波ハザード曲線から地震断層の再現期間を特定した後、その地震断層のパラメータを用いて津波遡上計算を実施することで再現期間別の津波浸水領域を評価する本研究の手法は、遡上計算時に、初期潮位や人工構造物等の情報を変更して再度計算することが容易であるという利点がある。再現期間別の津波ハザードマップを導出した後、最終的に、陸上において確率論的に評価した津波浸水深と津波による建築物の脆弱性評価を結合させ、ある一地点に立地する建築物の津波リスクの期待値を定量評価する手法を提案した。これは、狭域における津波リスクの定量評価手法の提案に該当する。提案した手法を、相馬、仙台、気仙沼に適用し、評価結果を比較した。まず、50パーセンタイル波高を用いたリスク評価結果に着目すると、仙台や気仙沼に立地する鉄骨造の建築物は、相馬に立地する鉄筋コンクリート造の建築物よりもリスクが低いこと等、建築物の脆弱性評価だけでは理解不可能な事実を明らかにした。津波リスクは、津波ハザード評価の情報や津波脆弱性評価の情報を個々に捉えていたのでは正しく理解出来ず、これらの情報を組み合わせて初めて適切に理解出来ることを、事例を通して定量的に示した。また、津波リスクの期待値は、5パーセンタイル波高を用いた結果と50パーセンタイル波高を用いた結果で1桁程度、さらに、50パーセンタイル波高を用いた結果と95パーセンタイル波高を用いた結果で1桁程度相違することを明らかにする等、津波ハザードの不確実性に起因する津波リスクの不確実性を初めて定量的に示した。提案した津波リスクの定量評価手法は、国内外を問わず、どの地域にも応用可能であり、別地域に立つ別構造の建築物が保有する津波リスクを定量的に評価することで、津波リスクの大小を比較・検討することが可能となるため、防災、土木・建築、不動産、保険等の分野における意思決定時の指標として有効活用されることが期待できる。

第5章では、広範な地域に亘って立地する多数の施設群を対象として、それら施設群全体が保有する津波リスクを定量的に評価する手法を提案する。これは、広域における津波リスクの定量評価手法の提案に該当する。全国的に工場・事務所等を展開している企業では、全社的なリスク管理を推進する動きが広がっており、保有資産

のリスクを合理的かつ最適な手法で管理してリターンを最大化することで、企業価値を高めようとしている。そのような中、一地点に立地する建築物のリスクを詳細に評価するだけではなく、全国等の広域に亘って多数散在する事務所、工場等の企業の施設群が、全体として保有するリスクを定量的に評価することが重要になってきている。広域に亘って存在する施設群に対して、非線形長波方程式を用いた津波数値計算で、考え得る地震断層毎にそれら施設群立地点での津波浸水深を個別に計算していくことは、一般的な企業の計算資源や時間の制約等を考慮すると現実的ではない。そこで、エネルギー保存則を用いた津波浸水深の評価手法を採用することで、非線形長波方程式を用いた評価手法と比較して、計算コストを大幅に削減し、広域に亘って多数散在する施設群立地点での津波浸水深を比較的短期間に計算出来ることを示した。千島海溝、日本海溝、南海トラフ沿いの125の地震波源を用いて、エネルギー保存則による津波浸水深の評価手法により、日本国内の発電所立地点に立地する建築物を対象として津波リスクを定量的に評価した結果、年間の津波損害割合の期待値は、火力発電所、原子力発電所、風力発電所、バイオマス発電所、太陽光発電所の順に大きいことが把握できた。提案した津波リスクの定量評価手法は、民間企業や、銀行・保険会社等の金融機関が、経営判断のために広域に亘って存在する多数の保有資産や顧客の津波リスクを定量評価する際の手法として活用されることが期待できる。

第6章では、本研究により得られた成果を総括し、津波リスク評価に関しての今後の課題を述べる。今後の課題として、地震起因以外の山体崩壊や海底地滑りに起因する津波の確率論的リスク評価手法の構築、津波による人工構造物の破壊確率を考慮したリスク評価手法の構築、津波による二次災害の定量的リスク評価手法の構築等を挙げた。津波リスク評価に関しては、リスクの不確実性をどのように解釈し、どのように社会に発信すべきかについて、工学的な視点から議論されるべき余地が多く残されていると考えられる。

論文審査結果の要旨

2011 年東日本大震災での 3.11 津波は、日本列島の東北地方太平洋側の地域を中心に甚大な被害をもたらした。この大震災以降、一般事業体においては、保有する津波リスクを定量化し、適正に管理することがより一層求められている。津波リスクの定量評価手法として、確率論的津波ハザード評価や津波フラジリティ評価等で構成される確率論的リスク評価手法があるが一般建築物への適用性には限界がある。また、既往の評価手法は、一般事業体の経営判断に資する津波リスクを定量化することは出来ない。本研究では、狭域および広域の観点から、一般的な建築物の直接被害を対象とした津波リスクの定量評価手法を提案するものである。その内容と評価を以下に示す。

1 章は、序論である。

2 章では、津波波高のデータベースを用いて、観測値のみから津波波高の期待値を評価する手法を提案した。非線形回帰分析の結果、各地点での年超過確率と津波波高の関係を導くことが出来た。この結果は新しい知見であり意義は大きい。

3 章では、3.11 津波の知見・教訓を踏まえ、巨大断層の破壊伝播速度や破壊開始点の変化が津波波高に及ぼす不確実性を、モンテカルロ手法を用いて確率分布で定量化する手法を提案した。また、東北地方沖合における津波波高の不確実性を定量化し、不確実性の地域差を明らかにした。これは、確率的評価に不可欠な項目であり、得られた結果は高く評価できる。

4 章では、沖合での確率津波波高を用いて確率論的に津波遡上域を評価する手法を構築し、津波ハザードの確率論的評価とフラジリティ評価を結合させたリスク曲線を用いて、一般的な建築物の直接被害を対象とした津波リスクの定量評価手法を提案し、具体的な評価結果を得ることが出来た。

5 章では、エネルギー保存則を用いた津波浸水評価手法を採用することで計算コストを抑え、広域に多数散在する建築物群を対象として、それら全体が保有する津波リスクの定量評価手法を提案した。これにより、沿岸での各種発電所での津波による予想被害額を出すことが可能となった。

6 章では、本研究で得られた結果を整理し、結論を述べている。

以上の成果により、本研究は、3.11 津波の知見・教訓を踏まえ、一般事業体の経営判断に資する、一般的な建築物の直接被害を対象とした津波リスクの定量評価手法を新規に提案したものであり、学術的な意義も大きい。今後も津波工学の発展や社会への防災・減災への貢献が大いに期待される。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。